

工学研究科・工学部運営会議提出 平成 28 年 2 月 10 日
工 学 研 究 科 委 員 会 提 出 平成 28 年 2 月 17 日
工 学 研 究 科 教 授 会 提 出 平成 28 年 2 月 17 日

兵庫県立大学大学院
工学研究科長 山崎 徹 様

博士論文審査委員

教授 永田 正義

教授 藤原 関夫

教授 上野 秀樹

教授 本多 信一

博 士 論 文 審 査 報 告 書

申請者 花尾 隆史 より平成 27 年 12 月 16 日に受理した博士論文について慎重に審議した結果、別紙のとおり報告します。

博士論文審査報告

(論文題目) 球状トーラスプラズマの同軸ヘリシティ入射電流駆動及び
ドップラー分光計測に関する研究

(申請者) 花尾 隆史

1. 論文内容の要旨

環境負荷が低く、燃料枯渇の懸念が無い発電方式として核融合プラズマを用いた発電方式が提案されており、その実用化が期待されている。核融合発電炉の実用化とその普及には未だにいくつかの問題点があり、とりわけその経済性は発電炉として普及する上で避けられない課題である。現在、核融合発電炉の方式として、磁場閉じ込めトカマク方式が最も実用化に近く、核融合反応による入出力エネルギー比が 1 を超える装置も存在している。このトカマク方式に対して、低アスペクト比(プラズマ小半径/大半径)でかつ高ベータ(プラズマ圧力/磁場圧力)である球状トーラス(ST)磁場配位による閉じ込め方式が提案され、国内外で研究が活発に行われている。

ST 方式は高い閉じ込め効率で装置構造の小型化が期待できるが、トカマクの中心領域を小さくすることで装置の小型化を図るためにプラズマ電流の立上げに必要な誘導コイルの磁束が十分取れず、プラズマ電流の駆動・維持が課題となっている。この解決策の一つとして、同軸ヘリシティ入射(CHI)による ST プラズマの電流立上げ・維持が提案され、その有用性の実証や電流駆動と閉じ込め性能の関係性、生成プラズマの磁場配位や温度・密度の特性、プラズマ生成過程における電磁流体力学(MHD)的な不安定性や緩和現象の発生メカニズム等の探求が行われている。

本研究は、外部磁場を変化させることで CHI による高効率なプラズマ生成の条件や ST プラズマの平衡磁場配位、MHD 不安定性、磁気ヘリシティの保存性、イオンの加熱機構等の物理現象の観測・解明を行うことを目的として行われた。特に、イオンドップラー分光計測に関して、ST プラズマの温度分布形成やイオン加熱に関する物理現象の観測・解明を行う為に多点同時計測の可能なイオンドップラー分光計測システムの開発を行っている。これらにより、CHI 方式による ST プラズマの生成過程における平衡磁場配位の詳細な構造が明らかになり、閉じた磁束の形成が検証された。さらに電流密度分布の変化により発生する MHD 不安定性と電子温度・密度、イオン温度の空間分布特性との関係性を調べることで、不安定性の原因とイオン加熱機構に関する新たな知見が得られた。本論文はこれらを以下に示す各章にまとめられている。

第 1 章では序論として、本研究の背景や目的について述べている。第 2 章では CHI による電流駆動やヘリシティ入射に関する理論について述べている。第 3 章では研究

対象となる ST プラズマを閉じ込める HIST 装置と各計測機器について述べている。第 4 章ではプラズマの発光スペクトルのドップラー広がり・シフトからイオン温度・フローを計測するドップラー分光計測システムについて述べている。本研究ではパルスプラズマに対して一般的に使用されている多チャンネル光電子増倍管を用いた単点分光計測に加え、新たに高速カメラを用いた多点分光計測システムの開発を行っている。本章では開発した多点イオンドップラー分光計測システムの概要とその性能評価、および HIST 装置以外のプラズマ閉じ込め装置への適用例として米国ワシントン大学の HIT-SI3 装置での適用結果についても述べている。第 5 章では CHI による ST プラズマ生成実験としてトランジェント CHI 実験の結果及び考察を述べている。本章では外部磁場を変化させた際のプラズマ断面全体の内部磁場計測及び第 4 章で開発した多点分光計測の結果について述べている。内部磁場計測により、ST プラズマの生成過程における磁気リコネクションの観測や外部磁場を変化させることによって ST プラズマの軸対称性が崩れることが観測された。多点分光計測により、ST プラズマの生成時におけるイオン温度分布形成の様子が得られた。また、外部磁場を変化させた際に生じる不安定性や安定的なプラズマ維持時におけるヘリシティバランスに関する考察を述べている。第 6 章では CHI の新たな可能性として提唱されているマルチパルス CHI に関して、ST プラズマに対して初めて適用されたダブルパルス CHI 実験の結果及び考察を述べている。CHI を繰り返すことで ST プラズマの放電時間が伸長し、プラズマ電流の増加が観測されている。外部磁場を変化させた際の電流密度分布の変化や、単点分光計測によって CHI によるイオンの選択的加熱が観測されている。また、外部磁場の変化とプラズマの安定性やイオン加熱に寄与するイオンフローや磁気揺動に関する考察を述べている。第 7 章では本論文全体の総括を述べている。

2. 論文審査結果の要旨

本論文は、将来のコンパクトで経済的な核融合発電炉を目指した球状トーラス型プラズマ閉じ込め研究において、効率的なプラズマ電流の立ち上げと定常維持のための同軸ヘリシティ入射(CHI)法の有用性を明らかにしている。さらに、CHI 法で生成維持される球状トーラスプラズマのイオン温度を空間計測することを目的に多点イオンドップラー分光(IDS)計測装置の開発を行い、実験で観測されたイオン加熱機構について論じている。

まず、高速で長時間の計測が可能であり、光学設計の簡易な高速カメラを用いた新方式の多点 IDS 計測システムを米国ワシントン大学と共同で開発を行っている。開発された計測システムは、プラズマからの発光スペクトル線に対して高い波長分解能をもち、チャンネル間のクロストークが十分無視できる優れた装置性能を示している。また、その計測システムを本学の HIST 装置において実施されている CHI 実験に適応し、ド

ップライオン温度とプラズマ流速の空間分布を計測することに成功し、同計測器が有効に動作することを実証している。

次に、プラズマ電流の立ち上げに着目したランジェントCHI実験において生成されたプラズマの基礎特性についてIDS計測だけでなく、磁気プローブによる内部磁場計測や静電プローブを用いた電子温度、密度計測によって詳しく調べている。低バイアス磁束印加の条件では、プラズマ電流とイオン温度の高いプラズマが形成されたが、電磁流体力学的なキンク不安定性が発生することでプラズマの平衡磁場構造が壊れ、イオン温度と電子密度が急激に減少することを初めて見出している。また、周辺部においてイオンが電子に比べて選択的に加熱されることを初めて観測し、そのイオン加熱機構として、プラズマ電流密度の集中とキンク不安定性によるピンチ圧縮効果によるものと考察している。また、バイアス磁束を強くすることで電流密度分布が改善され、不安定性の発生を回避できることを見出している。さらに、CHI法の理論モデルである磁気ヘリシティの保存性についても検討を行っており、その妥当性の検証は本方法のスケーリング則を明確にするものであり、大型球状トラス装置に適応する際の設計指針となる有用な知見を示した。

最後に、本論文では、定常電流駆動のためのマルチパルスCHI法の提案を行っている。本新手法はダイナモによって電流駆動される過程とプラズマ抵抗で減衰する安定な過程を繰り返すことで、時間平均として閉じ込め性能を大きく損なわず、プラズマを長時間維持できる特徴がある。この方法を初めてHIST装置に適応し、その原理実証に成功している。

これらの研究成果は、最近の核融合エネルギー開発とプラズマ基礎科学の発展に大きく貢献するものと考えられる。

また、本研究内容に関する公表状況は、査読付き学術論文として筆頭著者4報(内英文学術誌2報)あり、国内外の学会でも高く評価されている。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成28年1月27日、論文内容およびそれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

平成28年2月17日

主査 永田 正義 印

副査 藤原 関夫 印

副査 上野 秀樹 印

副査 本多 信一 印